

Трансформация состава смолисто-асфальтеновых компонентов террагенного органического вещества сверхглубоких скважин Сибири в мезо- и апокатагенезе

К.В. Долженко^{1*}, Л.С. Борисова^{1,2}, А.Н. Фомин^{1,2}, И.Д. Попова^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

На примере органического вещества (ОВ) из отложений Тюменской (СГ-6) и Средневилюйской-27 (СВ-27) сверхглубоких скважин Сибири прослежена эволюция элементного состава гетероциклических компонентов рассеянного ОВ в катагенезе. В ходе мезокатагенеза состав асфальтенов и смол террагенного ОВ претерпевает направленные изменения: идет падение содержания водорода и кислорода, обогащение углеродом, графитизация структуры. В апокатагенезе за счет высокотемпературной деструкции, с одной стороны, происходит конденсация отдельных блоков асфальтенов и их переход в нерастворимую форму (формирование эпиасфальтеновых керогенов). С другой стороны, более легкая часть асфальтенов идет на новообразование углеводородов и образование газов – отмечены рост концентраций первых в процентах относительно остаточных битумоидов, а также структурные перераспределения внутри бензольных и спиртобензольных смол. По всем изученным параметрам элементного состава установлено симбатное (однонаправленное) преобразование смолистых и асфальтеновых компонентов битумоидов СГ-6 и СВ-27 в жестких термобарических условиях. Полученные результаты рекомендуют учитывать при прогнозе новых зон нефтегазоаккумуляции в глубокопогруженных горизонтах.

Ключевые слова: асфальтены, смолы, элементный состав, катагенез, террагенное органическое вещество, сверхглубокие скважины

Для цитирования: Долженко К.В., Борисова Л.С., Фомин А.Н., Попова И.Д. (2023). Трансформация состава смолисто-асфальтеновых компонентов террагенного органического вещества сверхглубоких скважин Сибири в мезо- и апокатагенезе. *Георесурсы*, 25(3), с. 119–128. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.15>

Введение

Известно, что в зоне мезокатагенеза структурные преобразования асфальтенов террагенного органического вещества (ОВ) согласуются с изменениями структуры и геохимических свойств углей, что позволяет использовать асфальтены для диагностики степени катагенетической преобразованности (Борисова, Конторович, 1991; Конторович, Борисова, 1994; Борисова, 2004, 2016). По мнению М.П. Габинет и Л.М. Габинет (1988), асфальтены террагенного ОВ, находящегося уже на стадиях апокатагенеза, из-за своей сложной ароматической структуры и наличия коротких алкановых фрагментов генерируют в основном метан и его легкие гомологи. В то же время асфальтены аквагенного ОВ, в структуре которых больше нафтеновых колец и длинных алифатических цепей, по-видимому, могут генерировать более разнообразные типы углеводородных соединений (Конторович, Рогозина, 1967; Борисова, 2008 и др.). В работе М.П. Габинет и Л.М. Габинет (1988) при изучении катагенетической зональности распределения битумоидов углей на больших глубинах в отложениях палеогена Предкарпатского прогиба и палеозоя Днепровско-Донецкой впадины отмечено,

что глубже 5500 м асфальтены отсутствуют. По их мнению, ниже идут процессы интенсивного газообразования.

Однако А.Э. Конторович с соавторами (1973) при исследовании динамики изменения состава рассеянного и концентрированного террагенного ОВ выявили несколько максимумов на кривых изменения количества асфальтенов в битумоидах рассеянного органического вещества (РОВ) и углей в зоне катагенеза и предположили возможность существования более поздних этапов нефтегазообразования. Авторы этой работы предположили, что после завершения главной фазы нефтеобразования происходит деструкция асфальтенов с новообразованием углеводородов (УВ), а оставшаяся часть асфальтенов сильно конденсируется.

Вслед за указанными выше авторами на проблему изучения террагенного ОВ обратили внимание И.А. Зеличенко, С.Г. Неручев, И.А. Половникова, Е.А. Рогозина и др. (Зеличенко и др., 1978; Неручев, 1983). Они также установили минимумы и максимумы выходов битумоида в эволюции керогена и выделили следующие циклы: 1) разрыв химических связей (разрыхление) под действием тепловой энергии; 2) активизация новообразования (генерация) вследствие изменения структуры; 3) резкое падение новообразования и уплотнение структуры керогена (стабилизация). Так, максимумам выхода битумоида соответствует значительная потеря углерода и водорода вследствие деструкции, минимумам – периоды стабилизации (конденсации) керогена с метанообразованием,

* Ответственный автор: Кирилл Васильевич Долженко
e-mail: kirka.nsk@gmail.com

© 2023 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

о чем свидетельствует общее обуглероживание керогена. Аналогичный процесс наблюдается и для второго периода интенсивного новообразования. Первому пику генерации соответствуют смолистые битумоиды с повышенными содержаниями циклических и алифатических УВ. Следующий за ним второй максимум (градации МК₁²–МК₃¹) С.Г. Неручев по изменению элементного состава (значительному снижению содержания углерода на фоне возросшего отношения углерода к водороду) связывает с проявлением главной фазы нефтеобразования (ГФН) рассеянного ОВ гумитов. В продуктах генерации преобладают гомологи метана.

По материалам скв. Средневилуйская-27 И.Д. Поляковой, Л.И. Богородской и Е.И. Соболевой (1991) была представлена схема эволюции нерастворимой части террагенного ОВ в процессе катагенеза на основании изучения элементного состава, качественного и количественного изменения кислородсодержащих групп. Так, на градации МК₁¹ преобразование нерассеянного ОВ связано, помимо деалкилирования, с процессами декарбоксилирования и дегидроксилирования, а уже на МК₁² (нерассеянное ОВ, лишенное карбоксильного кислорода) потери кислорода, по всей видимости, вызваны разрывами энергетически малоемких мостиковых связей. В результате этого «разрыхления» (вследствие разрыва простых эфирных связей) на более поздних градациях МК₂–МК₃² структурные единицы керогена объединяются уже через углерод-углеродные связи. Таким образом, при повышении карбонизации, конденсированности структуры и потери большей части водорода уже к концу мезокатагенеза – началу апокатагенеза вещество теряет практически полностью и газогенерационный потенциал.

Позднее, при изучении асфальтенов углей Донбасса Н.П. Силина с соавторами (1992) также показала, что на градации АК₁ и выше наблюдается аномальная картина изменения всех параметров асфальтенов: резко падает содержание углерода, повышается количество водорода и максимального значения достигает содержание кислорода. Геохимические особенности строения гетероциклических компонентов в катагенезе выявлены на образцах из глубоких скважин и других районов (Файзуллина и др., 1992 и др.).

Действительно, на границе мезо- и апокатагенеза происходит малоизученная «обратная» трансформация состава смолисто-асфальтеновых компонентов (САК) (Борисова, 2008; Borisova, 2019; Borisova, Fomin, 2020; Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020). С учетом значимости полученных выводов после проведения исследований преобразования САК в отдельных скважинах необходимо продолжить развитие теоретических представлений и экспериментальных исследований, сравнить распределение содержаний и состава смолисто-асфальтеновых компонентов в ОВ сверхглубоких

скважин СГ-6 и СВ-27 по мере роста катагенеза. Это позволит объяснить трансформацию их состава в условиях высоких температур и давлений, например подтвердить деструкцию асфальтенов, приводящую к высвобождению УВ из их структуры (окклюдируемые УВ) (Snowdon, 2016; Каширцев, 2018; Borisova, Fomin, 2020; Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020).

Цель настоящей работы – обобщить имеющиеся данные по содержанию и составу высокомолекулярных гетероциклических компонентов (бензольных, спиртобензольных смол и асфальтенов) битумоидов в жестких термобарических условиях на примере геохимических особенностей преобразования ОВ сверхглубоких скважин Сибири.

Материалы и методы

В работе проведено сравнительное изучение трансформации состава смолисто-асфальтеновых компонентов ОВ сверхглубоких скважин СГ-6 и СВ-27 в апокатагенезе. Тюменская сверхглубокая скважина (СГ-6), расположенная на севере Западной Сибири, является одной из самых глубоких скважин (забой 7502 м) в Сибири, вскрывших непрерывный разрез мезозойско-кайнозойского чехла (Сурков и др., 1993). Юрско-триасовый осадочный разрез СГ-6 представлен терригенными породами (аргиллитами, алевролитами, песчаниками). Сверхглубокая скважина Средневилуйская-27 (СВ-27) расположена на территории Вилуйской гемисинеклизы, в западной части Хапчагайского мегавала, достигла глубины 6519 м. Разрез ее также представлен аргиллитами, алевролитами и песчаниками (Граусман, Мейен, 1987).

Поскольку целью настоящей работы было изучение террагенного (гумусового) ОВ, отбирались только те образцы, для нерастворимых остатков и асфальтенов которых изотопный состав углерода варьирует в пределах от –22,0‰ до –27,0‰ (Конторович и др. 1985а, 1985б). Сформирована коллекция из 82 проб, для которых определен групповой состав, сделаны замеры отражательной способности витринита (R_{v}° , %) и 76 определений элементного состава (С, Н, S, N – углерод, водород, сера, азот) (табл. 1).

Изучение ОВ пород проводили в ИНГТ СО РАН по методике, разработанной под руководством академика А.Э. Конторовича (Борисова и др., 2019). Органическое вещество экстрагировали из породы хлороформом. Асфальтены осаждали петролейным эфиром. Мальтевую часть разделяли на фракции в хроматографических колонках. Замеры отражательной способности проводили на микроскопе-спектрофотометре МСФП-2 (АО «ЛОМО», Россия) при длине волны 546,1 нм в иммерсионной среде. Содержание углерода, водорода, серы и азота (С, Н, S, N) определяли микрометодом скоростного сжигания в быстром токе кислорода из одной навески на элементном анализаторе EA 1110 (CE Instruments, Италия), кислород

Скважина	Групповой состав	Элементный состав			
		Асфальтены	Бензольные смолы	Спиртобензольные смолы	Суммарное содержание смол
СГ-6	26	23	21	9	4
СВ-27	56	5	5	6	3

Табл. 1. Количество анализов группового состава битумоида и элементного состава смолисто-асфальтеновых компонентов скважин СГ-6 и СВ-27

рассчитывали как разницу между 100% и процентным содержанием гетероатомных компонентов. Получены атомные соотношения водорода, углерода и кислорода ($H/C_{ат}$, $O/C_{ат}$), которые являются основными геохимическими параметрами состава. Измерение изотопного состава углерода в пробах нерастворимых остатков проводили на масс-спектрометре МИ 1201В (ПО «Электрон», Украина) (ТФ СНИИГГиМС, Н.Л. Падалко), асфальтенов – на масс-спектрометре Finnigan MAT-253 («Thermo Finnigan», Бремен, Германия) (ИГМ СО РАН, А.Н. Пырьев).

Результаты

Для корректной оценки изменения группового состава битумоидов и элементного состава его гетероатомных компонентов в двух сверхглубоких скважинах анализ проведен на основе отражательной способности витринита (R_{vtr}^o , %). Лено-Вилуйский и Западно-Сибирский осадочные бассейны претерпели различную историю погружения и имели отличный друг от друга геотермический режим недр (рис. 1) (Фомин, 2011; Исаев и др., 2014; Фролов и др., 1987; Семенов, Железняк, 2013), в связи с чем зависимости исследуемых характеристик состава САК от глубины не будут показательными и сопоставимыми с точки зрения эволюции террагенного ОВ в процессе катагенеза.

Рассмотрим групповой состав в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27 (рис. 2, табл. 2). На грациях $МК_1^2$ – $МК_2$ содержание УВ достигает максимума в обеих скважинах в мезокатагенезе, что объясняется проявлением главной зоны нефтеобразования (ГЗН) в террагенном ОВ (Вассоевич, 1967; Конторович и др., 1967; Неручев, 1983). Содержания смол здесь, напротив, имеют наименьшие значения. Большой разброс значений относительного содержания компонентов группового состава может быть объяснен активно протекающими процессами нафтидогенеза и связанными с ними первичной и вторичной миграциями. Первое значительное изменение в распределении наблюдается при переходе к грациям $МК_3^{1-2}$: резко снижается содержание УВ и растет доля смолистых веществ, содержание асфальтенов лишь незначительно увеличивается. Отмеченные тенденции имеют прогрессирующий

характер от начала к концу интервала и продолжают на грациях $АК_1$. Второе значительное изменение компонентов происходит на грациях $АК_2$: стремительно падает доля асфальтенов, повышается процентное содержание смол, отмечается слабое снижение скорости образования УВ. На $АК_3$ асфальтены полностью выходят из группового состава в скв. СВ-27, формируя нерастворимый остаток (эпиасфальтеновый кероген (Конторович и др., 2020)), в скв. СГ-6 наблюдается схожая тенденция (что отмечалось в работах (Борисова, 2008; Borisova, 2019; Borisova, Fomin, 2020; Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020)). Смолы и углеводороды достигают равновесных значений в соотношении 60:40. При сравнении двух скважин установлено, что образцы, характеризующиеся одинаковыми или схожими значениями отражательной способности витринита, локализуются в окрестностях друг друга (рис. 2). С ростом катагенеза значения содержаний компонентов группового состава изменяются симбатно и дополняют промежутки без исследованных образцов, связанные с наличием ОВ, выходом хлороформенного битумоида или же частотой и качеством отбора керна (табл. 2). Последнее является распространенной проблемой при изучении глубокопогруженных горизонтов. Несмотря на наличие интервалов, где имеющаяся выборка не позволяет сделать точного сопоставления, данные не противоречат друг другу, а видимые тенденции (рис. 2) позволяют судить об общности протекающих процессов. Именно с этой позиции нами будет проводиться обсуждение полученных результатов.

Рассмотрим элементный состав гетероатомных компонентов битумоида (рис. 3, 4, табл. 3). Так как в апокатагенезе в скв. СВ-27 в ходе аналитических работ не удалось разделить смолы на фракции, для них приведены суммарные значения. Для сравнения данных из двух скважин для смол из скв. СГ-6 был рассчитан элементный состав на сумму по процентному вкладу. Исходя из принципа аддитивности элементов в системе, был произведен расчет вклада каждого элемента в сумму:

$$N = (A) \cdot (B) + (C) \cdot (D),$$

где N – процентное содержание (%) элемента в сумме смол, A – % элемента в бензольных смолах, B – доля

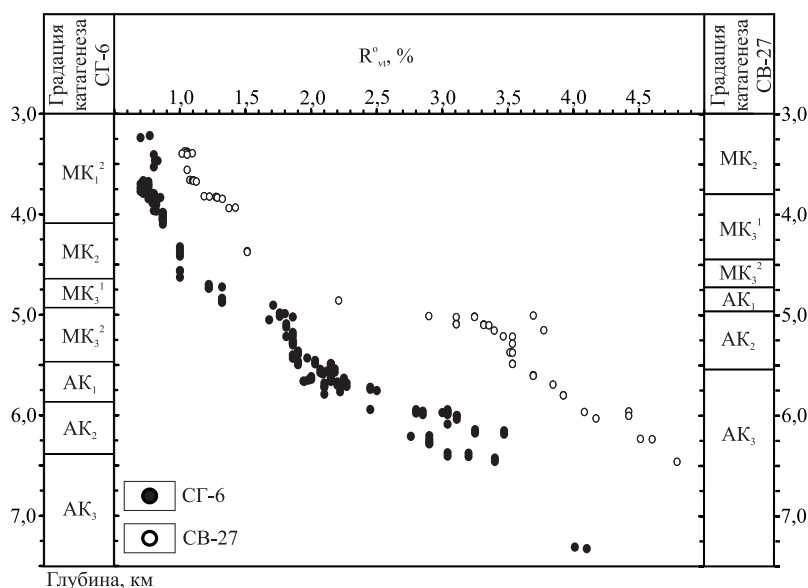


Рис. 1. Изменение отражательной способности витринита (R_{vtr}^o) в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27

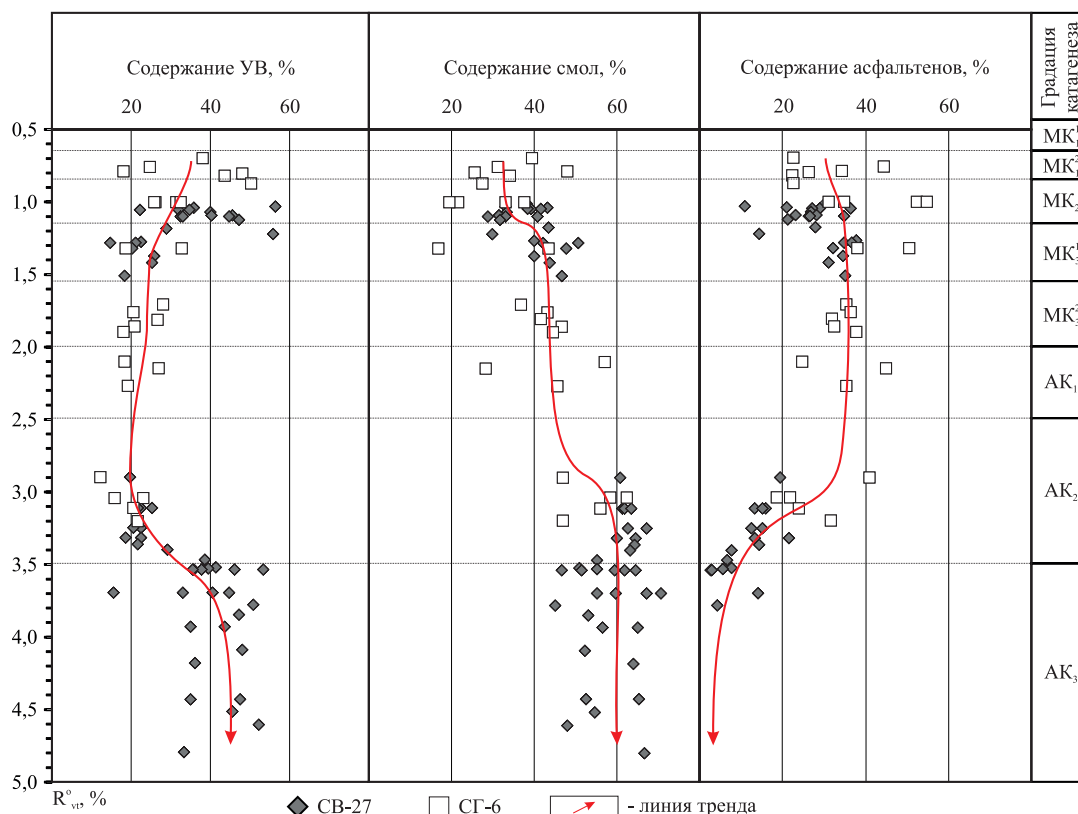


Рис. 2. Изменение группового состава битумоидов с ростом катагенеза в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27. Примечание: линии тренда построены на основании поинтервального среднего между двумя скважинами и сглажены вручную

Градация	Углеводороды, %		Смолы, %		Асфальтены, %	
	СГ-6	СВ-27	СГ-6	СВ-27	СГ-6	СВ-27
МК ₁ ²	34,40	—	35,60	—	30,00	—
МК ₂	33,17	38,10	27,80	35,68	39,03	26,21
МК ₃ ¹	25,65	25,77	30,10	42,64	44,25	31,59
МК ₃ ²	22,78	—	42,50	—	34,72	—
АК ₁	21,39	—	43,64	—	34,97	—
АК ₂	18,61	23,80	54,08	62,18	27,31	14,03
АК ₃	31,43	40,71	55,71	57,49	12,86	5,66

Табл. 2. Средние значения содержаний компонентов группового состава битумоидов в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27 на разных градациях катагенеза

бензольных смол, С – % элемента в спиртобензольных смолах, D – доля спиртобензольных смол.

Линии тренда в зоне апокатагенеза на графиках «Спиртобензольные смолы + суммарное содержание смол» строились для суммарного содержания фракций (рис. 3, 4). На градациях МК₁²–МК₃¹ происходит прогрессирующая карбонизация всех гетероатомных компонентов битумоида: Н/С_{ат} в асфальтенах снижается от 1,0 до 0,7, в бензольных смолах (наиболее интенсивно) – от 1,3 до 0,95, в спиртобензольных – от 1,4 до 1,1 (табл. 3, рис. 3). Параллельно карбонизации асфальтенов происходит их окисление – О/С_{ат} возрастает от 0,09 до 0,19. Слабое повышение содержания кислорода отмечено в бензольных смолах – от 0,04 до 0,09. Спиртобензольные смолы не показывают тенденций к изменению количества кислорода в составе. Такие характеристики отражают повышение ароматичности структуры гетероатомных компонентов и хорошо согласуются с затухающими процессами нефтидогенеза, когда термодеструкция затрагивает наиболее энергоемкие связи в керогене. На градации МК₃² происходит

перестройка структуры ОВ, которая и ранее отмечалась в ряде работ при изучении керогенов (Зеличенко и др., 1978; Полякова и др., 1991) и асфальтенов (Конторович и др., 1973; Борисова, Конторович, 1991; Силина и др., 1992; Конторович, Борисова, 1994; Borisova, 2019; Borisova, Fomin, 2020; Конторович и др., 2020). В составе асфальтенов и бензольных смол после достижения максимума содержания углерода на предыдущем этапе скачкообразно увеличивается содержание водорода, этому скачку соответствует максимальное содержание кислорода в мезокатагенезе (рис. 3, 4). К концу градации МК₃² структура асфальтенов и бензольных смол стабилизируется: резко падают отношения Н/С_{ат} и О/С_{ат} до минимального значения предыдущего интервала. Для спиртобензольных смол на этой градации определения элементного состава отсутствуют. В апокатагенезе (АК₁₋₃) все компоненты группового состава становятся более алифатичными, причем в отношении асфальтенов и бензольных смол этот процесс нарастающий: от 0,9 до 1,2 для первых, от 1,0 до 1,2 для вторых. Спиртобензольные смолы в СГ-6 и суммарное

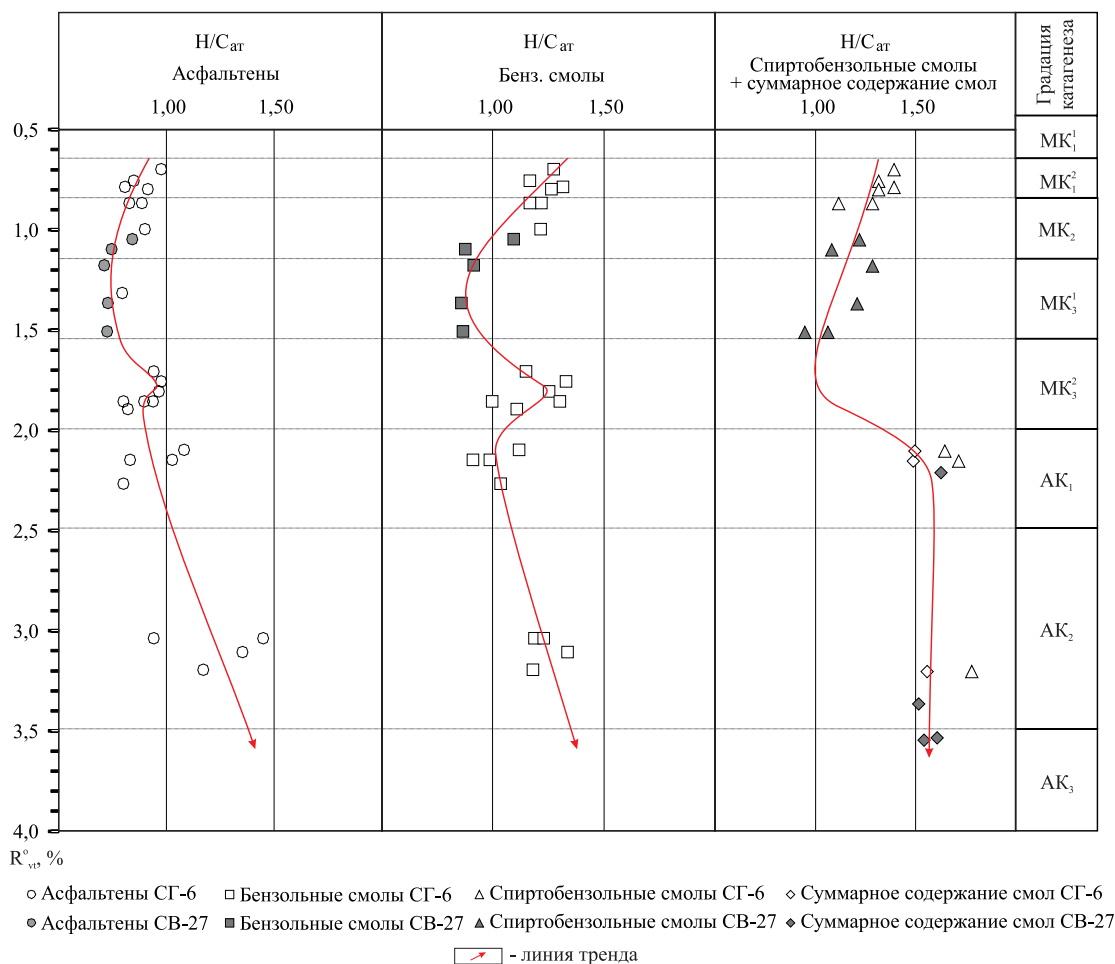


Рис. 3. Изменение атомного отношения $H/C_{ат}$ гетероатомных компонентов битумоида с ростом катагенеза в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27. Примечание: линии тренда построены на основании поинтервального среднего между двумя скважинами и сглажены вручную

содержание смол в СВ-27 при достижении апокатагенеза имеют значения $H/C_{ат}$, близкие к 1,5, на протяжении всего интервала. Отметим, что выход спиртобензольных смол более чем в два раза превышает выход бензольных в СГ-6, что позволяет по близости группировки точек на графиках предположить превалирование спиртобензольных смол в СВ-27. Процесс окисления в апокатагенезе затрагивает асфальтены и спиртобензольные смолы: $O/C_{ат}$ меняется от 0,16 до 0,24 для первых, от 0,32 до 0,40 для вторых (от 0,17 до 0,27 на АК₁₋₂ и 0,18 на АК₃ для суммарного содержания смол). Бензольные смолы незначительно восстанавливаются – $O/C_{ат}$ снижается от 0,11 до 0,08. Полученные данные свидетельствуют о том, что в апокатагенезе водород и кислород селективно сохраняются в гетероатомных компонентах за счет сокращения доли углерода, т.е. за счет формирования конденсированных блоков через углерод-углеродные связи и выпадения их в нерастворимую форму. При этом легко прослеживается обратно пропорциональная зависимость между снижением доли асфальтенов в групповом составе (рис. 2) и ростом отношений $H/C_{ат}$ и $O/C_{ат}$ (рис. 3, 4).

Обсуждение результатов

По изменению содержаний углеводородной и гетероатомных компонентов в составе битумоидов террагенного ОВ в обеих скважинах можно отметить общность и однонаправленность протекающих процессов (рис. 2–4).

Некоторые различия в трендах в области ГЗН легко объясняются процессами миграции вследствие активного новообразования, которые зависят в том числе от свойств вмещающей матрицы, способной произвести хроматографический эффект на состав битумоида (Трофимук, Конторович, 1965). Ранее при работе с образцами скважины СГ-6 не удалось проследить осаждение асфальтенов из битумоида в отличие от сверхглубоких скважин Вилуйский синеклизы (Конторович и др., 1988) и Днепровско-Донецкой впадины (Габинет, Габинет, 1988), где глубже 5300 м асфальтены уже не фиксируются. В битумоидах скв. СГ-6 (Борисова, 2008) на глубине ниже 6000 м они еще присутствуют, но вследствие различного геотермического режима недр сопоставления по глубине не позволяли выполнить достоверную корреляцию. Построение графиков изменения параметров группового состава битумоида и элементного состава его гетероатомных компонентов от палеотермометра в виде отражательной способности витринита позволило показать, что сохранение асфальтенов в разрезе скважины СГ-6 связано в первую очередь именно с недостаточной преобразованностью вещества. Тем не менее тренд на снижение их содержаний в составе битумоида вследствие процессов деструкции и конденсации (Конторович и др., 1988, 2020) отчетливо виден (рис. 2), что также подтверждается наличием окклюдированных соединений, обнаруженных ранее (Каширцев, 2018). Основная гипотеза появления

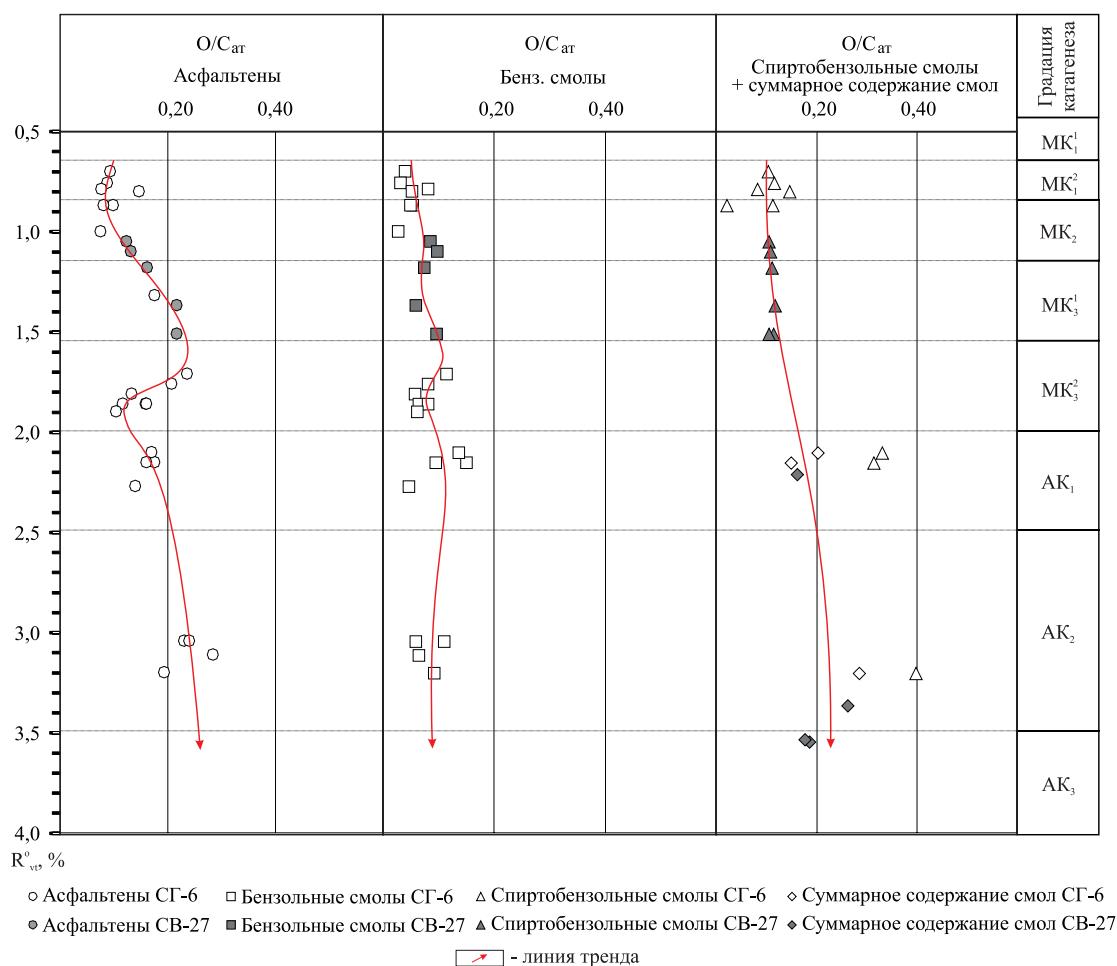


Рис. 4. Изменение атомного отношения O/C_{at} гетероатомных компонентов битумоида с ростом катагенеза в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27. Примечание: линии тренда построены на основании поинтервального среднего между двумя скважинами и сглажены вручную

Градация	Асфальтены		Бензолные смолы		Спиртобензолные смолы		Суммарное содержание смол	
	H/C _{ат}	O/C _{ат}	H/C _{ат}	O/C _{ат}	H/C _{ат}	O/C _{ат}	H/C _{ат}	O/C _{ат}
МК ₁ ²	0,89	0,10	1,26	0,05	1,35	0,11	—	—
МК ₂	0,84	0,10	1,12	0,06	1,18	0,09	—	—
МК ₃ ¹	0,72	0,19	0,95	0,09	1,13	0,11	—	—
МК ₃ ²	0,91	0,16	1,20	0,07	—	—	—	—
АК ₁	0,94	0,16	1,01	0,11	1,68	0,32	1,54	0,17
АК ₂	1,23	0,24	1,24	0,08	1,78	0,40	1,54	0,27
АК ₃	—	—	—	—	—	—	1,57	0,18

Табл. 3. Средние значения атомных отношений H/C_{at} и O/C_{at} для компонентов битумоидов в сверхглубоких скважинах СГ-6 и СВ-27 на разных градациях катагенеза

этих уникальных молекул связана с высвобождением адсорбированных и окклюзированных соединений при разрушении асфальтенов.

Результаты интерпретации элементного состава САК позволяют установить следующую стадийность превращений битумоида террагенного ОВ.

На этапе мезокатагенеза (градации МК₁²–МК₃¹) идет устойчивая карбонизация смолисто-асфальтеновых компонентов, уменьшается доля водорода и, как следствие, значение атомного отношения H/C_{at} . Формируется упорядоченная структура САК. Можно также предположить, что на состав оказывает влияние кероген: по мере его катагенетической зрелости продуцируются все более высокомолекулярные и ароматические соединения. В пользу

этого свидетельствует обратная корреляция между количеством УВ в составе и степенью ароматичности смол и асфальтенов, на это же указывает и рост содержания кислорода. По данным (Зеличенко и др., 1978; Неручев, 1983; Полякова и др., 1991), в керогене на этих градациях стремительно падает содержание гетероатомов, так как термодеструкция затрагивает наименее устойчивые мостиковые связи (в т.ч. кислородные), постепенно прекращается образование жидких УВ. В результате элементный состав здесь отражает совокупность процессов внутренней перестройки и «наследования» продуктов поздних этапов генерации. По-видимому, в силу наибольшего сродства с керогеном асфальтенов именно они селективно накапливают карбонил- и карбоксилсодержащие фрагменты.

На градации $МК_3^2$ происходит резкое изменение элементного состава всех компонентов. Согласно (Силина и др., 1992), разупорядочение структуры асфальтенов происходит вследствие разрыва азотсодержащих связей. Ранее было отмечено (Конторович и др., 1973), что в террагенном органическом веществе количество парамагнитных центров (КПЦ) растет с повышением катагенеза, при этом имеет место два минимума. В СВ-27 они приходятся на $МК_3^2$ (слабовыраженный) и $АК_2$ (сильновыраженный) (Меленевский и др., 1989) и свидетельствуют о снижении числа ароматических ядер, т.к. согласно описанию метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) В.М. Диндойн (1973) наиболее вероятными парамагнитными центрами в ОВ являются ароматические соединения. Основным продуктом генерации на данном этапе является метан, террагенное ОВ вступает в главную фазу газообразования (ГФГ) (Зеличенко и др., 1978; Неручев, 1983; Полякова и др., 1991). Так как водород и кислород перестают поступать извне, такие показатели указывают на «остаточный» принцип повышения их содержаний. Такое возможно, если взамен мостиковых гетероатомных связей структурные блоки соединяются через углерод-углеродные, вследствие чего какая-то часть вещества уже на этом этапе конденсируется в нерастворимую форму. К концу градации структура стабилизируется.

В апокатагенезе ($АК_{1-3}$) кероген в результате реализации генерационного потенциала уже не влияет на состав битумоида, т.е. перестает производить жидкие УВ, что согласуется с завершением ГЗН (ГФН) в террагенном ОВ на градации $МК_3^2$ (Зеличенко и др., 1978). Изменения в элементном составе связаны с последовательной конденсацией отдельных, главным образом ароматических блоков в ряду УВ – смолы – асфальтены (Конторович и др., 1988, 2020). С вступлением в апокатагенез ароматические соединения во фракции УВ (в скв. СВ-27 отношение насыщенных к ароматическим меняется от 1–2 в мезокатагенезе и до 5–10 в апокатагенезе (Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020)) формируют блоки, обогащающие ароматическую составляющую смол. Затем по принципу «снежного кома» за счет углерод-углеродных связей совокупность отдельных фрагментов конденсируется до структур, соответствующих асфальтенам, в итоге формируя эпиасфальтеновый кероген (Конторович и др., 2020), который по пиролитическим характеристикам относится к незрелому ОВ. По всей видимости, в обратную сторону процесс происходит менее выражено, чем предполагалось ранее (Конторович и др., 1988). На каждом этапе перехода мы видим только потери относительных содержаний углерода (%), затрачиваемого на конденсацию, а смолы и УВ достигают в среднем равных пропорций в апокатагенезе. Тем не менее снижение выхода хлороформенного битумоида (Конторович и др., 1973; Борисова, Конторович, 1991; Силина и др., 1992; Конторович, Борисова, 1994; Borisova, 2019; Borisova, Fomin, 2020; Конторович и др., 2020) указывает на постоянный отток нафтидов, главным образом метана, из системы битумоид – порода. Отсюда следует, что пределы существования главной зоны газообразования (ГЗГ) (ГФГ) могут быть тесно связаны со вторичным крекингом (деструкцией остаточного после миграции битумоида), на что указывают и авторы работы (Конторович и др., 2021).

При достижении апокатагенеза в гетероатомных компонентах растет и сохраняется содержание водорода на уровне элементного состава аквагенного керогена в начале ГЗН (ГФН), что позволяет судить о возможности их деструкции до УВ-газов на глубинах, превышающих 6–7 км.

Заключение

Полученные результаты являются очередным подтверждением правильности современной парадигмы о ведущей роли катагенеза в процессах преобразования органических масс в земной коре. Факторы температуры и в меньшей степени литостатического давления продолжают контролировать эволюцию ОВ и за пределами ГЗН, как было показано в настоящей работе, на групповом и элементном уровнях. Важно отметить, что в случае террагенных (гумусовых) разностей при рассмотрении превращений смолисто-асфальтовых (гетероатомных) компонентов битумоидов с позиции градаций катагенеза установленные закономерности позволяют предположить единый механизм преобразований для формаций разного возраста и различных осадочных бассейнов (в пределах терригенного разреза пород). Это подтверждается и сопоставлением приводимых в литературных источниках результатов изучения углей и их экстрактов с полученными в рамках настоящей работы данными. Уточнение глубинной зональности изменения элементного составов смолисто-асфальтовых компонентов ОВ скважин СГ-6 и СВ-27 в апокатагенезе позволило наряду с другими исследователями высказать предположение о продуцировании на больших глубинах углеводородов. Изучение особенностей характера преобразования состава и структуры смолисто-асфальтовых компонентов в условиях высоких температур и давления необходимо продолжить как на образцах других глубоких скважин, так и на модельных экспериментах с целью доказательного обоснования более поздней генерации УВ, а также для определения их массы и состава, что имеет прикладное значение при прогнозе новых зон нефтегазоаккумуляции и переоценке уже разрабатываемых глубокопогруженных горизонтов. Необходимо также выявить окислительное влияние минеральной среды, взаимодействие ОВ с оксидами минеральных компонентов породы в зоне высоких температур.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0011.

Литература

- Борисова Л.С. (2004). Гетероциклические компоненты рассеянного органического вещества и нефтей Западной Сибири. *Геология и геофизика*, (7), с. 884–894.
- Борисова Л.С. (2008). Геохимические особенности состава и структуры гетероциклических компонентов рассеянного органического вещества в мезо- и апокатагенезе (на примере скважины Тюменской СГ-6). *Литологические и геохимические основы прогноза нефтегазоносности: Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.* СПб.: ВНИГРИ, с. 93–98.
- Борисова Л.С. (2012). Введение в геохимию высокомолекулярных компонентов нефти. Новосибирск: НГУ, 90 с.
- Борисова Л.С. (2016). Асфальтены – наследники генетического кода керогена. *Геология нефти и газа*, (6), с. 75–78.
- Борисова Л.С., Конторович А.Э. (1991). Методические рекомендации по схеме изучения асфальтенов для целей диагностики нефтепродуцирующих пород и количественной оценки перспектив нефтегазоносности. Новосибирск: Изд-во СНИИГТМиМС, 28 с.

- Борисова Л.С., Фурсенко Е.А., Костырева Е.А., Тимошина И.Д. (2019). Комплекс химических и физических методов получения и исследования компонентов органического вещества пород и нефтей (методическое руководство). Новосибирск: РИЦ НГУ, 84 с.
- Вассоевич Н.Б. (1967). Теория осадочно-миграционного происхождения нефти. *Известия АН СССР, серия геологическая*, (11), с. 137–142.
- Габинет М.П., Габинет Л.М. (1988). Катагенетическая зональность и распределение залежей нефти и газа на больших глубинах в отложениях Предкарпатского прогиба и палеозоя Днепровско-Донецкой впадины. *Условия нефтеобразования на больших глубинах*. М.: Наука, с. 121–126.
- Граусман В.В., Мейен С.В. (1987). Стратиграфия верхнепалеозойских отложений Виллюйской синеклизы. *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*, (10), с. 54–60.
- Диндойн В.М. (1973). Спектроскопия ЭПР и ее возможности в органической геохимии. *Тр. СНИИГГиМС*, Новосибирск: СНИИГГиМС, Вып. 166, с. 37–54.
- Долженко К.В., Фомин А.Н., Меленевский В.Н. (2019). Геохимическая характеристика террагенного органического вещества верхнепалеозойского комплекса Виллюйской синеклизы и некоторые особенности его преобразования под действием термобарических условий больших глубин. *Георесурсы*, 21(4), с. 77–84. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.77-84>
- Зеличенко И.А., Неручев С.Г., Половникова И.А., Рогозина Е.А., Филатов С.С., Климова Л.И. (1978). Особенности катагенетического преобразования гумусовых разностей рассеянного органического вещества. *Накопление и преобразование органического вещества современных и ископаемых осадков*. М.: Наука, с. 119–125.
- Исаев В.И., Рылова Т.Б., Гумерова А.А. (2014). Палеоклимат западной Сибири и реализация генерационного потенциала нефтематеринских отложений. *Известия Томского политехнического университета*, 324(1), с. 93–101.
- Каширцев В.А. (2018). Углеводороды, окклюзированные асфальтенами. *Геология и геофизика*, 59(8), с. 1211–1219. <https://doi.org/10.15372/GiG20180806>
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985а). Закономерности фракционирования изотопов углерода в седиментах. *Геология и геофизика*, 26(9), с. 34–42.
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985б). Распределение стабильных изотопов углерода в седиментах различной генетической природе. *Геология и геофизика*, 26(7), с. 3–11.
- Конторович А.Э., Борисова Л.С. (1994). Состав асфальтенов как индикатор типа рассеянного органического вещества и нефтей Западной Сибири. *Геохимия*, 11, с. 1660–1667.
- Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р. (2021). Теория нафтидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе. *Геология и геофизика*, 62(8), с. 1026–1047. <https://doi.org/10.15372/GiG2021119>
- Конторович А.Э., Данилова В.П., Диндойн В.М. (1973). Изменение химического состава гумусового органического вещества и его парамагнитных свойств в зоне катагенеза. *Доклады АН СССР. Серия геологическая*, 209(6), с. 1431–1434.
- Конторович А.Э., Долженко К.В., Фомин А.Н. (2020). Закономерности преобразования террагенного органического вещества в мезо- и апокатагенезе. *Геология и геофизика*, 61(8), с. 1093–1108. <https://doi.org/10.15372/GiG2020116>
- Конторович А.Э., Парпарова Г.М., Трушков П.А. (1967). Метаморфизм органического вещества и некоторые вопросы нефтегазоносности (на примере мезозойских отложений Западно-Сибирской низменности). *Геология и геофизика*, 8(2), с. 16–29.
- Конторович А.Э., Полякова И.Д., Колганова М.М., Соболева Е.И. (1988). Превращение органического вещества в мезо- и апокатагенезе. *Советская геология*, 7, с. 26–36.
- Конторович А.Э., Рогозина Е.А. (1967). Масштабы образования углеводородных газов в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. *Тр. СНИИГГиМС*. Новосибирск: СНИИГГиМС, Вып. 65: *Геология и нефтегазоносность юго-востока Западно-Сибирской плиты*, с. 13–25.
- Меленевский В.Н., Полякова И.Д., Гладкий Ю.Г. (1989). Катагенетические преобразования органического вещества Виллюйской синеклизы. *Геология нефти и газа*, 9, с. 37–38.
- Неручев С.Г. (1983). Газообразование при катагенезе органического вещества осадочных пород. Л.: Недра, 164 с.
- Полякова И.Д., Богородская Л.И., Соболева Е.И. (1991). Преобразование органического вещества угленосных отложений Виллюйской синеклизы на больших глубинах. *Геохимия нефтегазовых отложений Сибири*. Новосибирск: СНИИГГиМС, с. 48–57.
- Семенов В.П., Железняк М.Н. (2013). Геотермические условия Виллюйской синеклизы. *Криосфера Земли*, XVII(4), с. 3–10.
- Силина Н.П., Каплан З.Г., Кунаева Н.Т., Клиндухов В.П. (1992). Экспериментальная модель преобразования асфальтенов в зоне катагенеза (на примере клареновых углей Донбасса). *Сборник трудов: Моделирование процессов нефтеобразования*. М.: Наука, с. 63–69.
- Современные методы анализа в органической геохимии (1973). Под ред. А.Э. Конторовича. *Тр. СНИИГГиМС*, Новосибирск: СНИИГГиМС, Вып. 166, 100 с.
- Сурков В.С., Девятков В.П., Жеро О.Г. (1993). Структура земной коры района Тюменской сверхглубокой скважины. *Геология и геофизика*, 34(1), с. 120–126.
- Трофимук А.А., Конторович А.Э. (1965). Некоторые вопросы теории органического происхождения нефти и проблема диагностики нефтепроизводящих толщ. *Геология и геофизика*, 6(12), с. 3–14.
- Файзуллина Е.М., Жукова А.В., Соловьева И.Л. (1992). Эмпирическая модель преобразования химической структуры сапропелевого рассеянного органического вещества в зоне катагенеза и апокатагенеза. *Сборник трудов: Моделирование процессов нефтеобразования*. М.: Наука, с. 56–63.
- Фомин А.Н. (2011). Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск: ИНГ СО РАН, 331 с.
- Фролов В.И., Сюндюков Ш.А., Бакин В.Е. (1987). О катагенезе органического вещества глубоких горизонтов центральной части Виллюйской синеклизы. *Доклады АН СССР*, 297(2), с. 442–444.
- Borisova L.S. (2019). The Origin of Asphaltenes and Main Trends in Evolution of Their Composition During Lithogenesis. *Petroleum Chemistry*, 59(10), pp. 1118–1123. <https://doi.org/10.1134/S0965544119100037>
- Borisova L.S., Fomin A.N. (2020). Transformation of Resin–Asphaltene Components of Dispersed Organic Matter in the Meso- and Apocatagenesis Zone. *Petroleum Chemistry*, 60(6), pp. 648–658. <https://doi.org/10.1134/S0965544120060031>
- Snowdon L.R., Volkman J.K., Zhang Z., Tao G., Liu P. (2016). The organic geochemistry of asphaltenes and occluded biomarkers. *Organic Geochemistry*, 91, pp. 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.11.005>

Сведения об авторах

Кирилл Васильевич Долженко – кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3
e-mail: kirka.nsk@gmail.com

Любовь Сергеевна Борисова – доктор геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

Александр Николаевич Фомин – доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; заведующий кафедрой геологии месторождений нефти и газа, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

Ирина Дмитриевна Попова – инженер лаборатории геохимии нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; студент магистратуры кафедры геологии месторождений нефти и газа, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

Статья поступила в редакцию 13.01.2023;
Принята к публикации 11.07.2023; Опубликована 30.09.2023

Composition transformation of terrigenous organic matter resinous-asphaltene components in super-deep wells in Siberia during meso- and apocatagenesis

K.V. Dolzhenko^{1*}, L.S. Borisova^{1,2}, A.N. Fomin^{1,2}, I.D. Popova^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

*Corresponding author: Kirill V. Dolzhenko, e-mail: kirka.nsk@gmail.com

Abstract. The evolution of the elemental composition of dispersed organic matter (DOM) heterocyclic components during catagenesis was traced via studying samples from the Tyumen (SG-6) and Srednevylyuy-27 (SV-27) super-deep wells of Siberia. During mesocatagenesis, the composition of terrigenous DOM asphaltenes and resins undergoes directed changes: a decrease in hydrogen and oxygen content, enrichment with carbon, and graphitization of the structure. During apocatagenesis, due to high-temperature destruction, on the one hand, there is a condensation of individual blocks of asphaltenes and their transition to an insoluble form (formation of epiasphaltenic kerogens – EPAK). On the other hand, the lighter part of the asphaltenes goes into the formation of hydrocarbons and gas formation – a relative increase in the concentration of the former in % by mass of residual bitumoids is noted, as well as structural redistributions within benzene and spirit-benzene resins. In all studied parameters of the elemental composition, a symmetrical (unidirectional) transformation of resinous and asphaltene components of bitumoids from the SG-6 and SV-27 wells under harsh thermobaric conditions is noted. The obtained results should be taken into account when predicting new oil and gas accumulation zones in deep-laid horizons.

Keywords: asphaltenes, resins, elemental composition, catagenesis, terrigenous organic matter, super-deep wells

Recommended citation: Dolzhenko K.V., Borisova L.S., Fomin A.N., Popova I.D. (2023). Composition transformation of terrigenous organic matter resinous-asphaltene components in super-deep wells in Siberia during meso- and apocatagenesis. *Georesursy = Georesources*, 25(3), pp. 119–128. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.15>

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the FNI FWZZ-2022-0011 project.

References

- Borisova L.S. (2004). Heterocyclic components of dispersed organic matter and oils in Western Siberia. *Geologiya i geofizika*, (7), pp. 884–894. (In Russ.)
- Borisova L.S. (2008). Geochemical features of the composition and structure of heterocyclic components of dispersed organic matter in meso- and apocatagenesis (on the example of the Tyumen SG-6 well). *Lithological and geochemical basis for predicting oil and gas potential: Proc. Int. Sci. and Pract. Conf.* St. Petersburg: VNIGRI, pp. 93–98. (In Russ.)
- Borisova L.S. (2012). Introduction to the geochemistry of high molecular weight components of oil. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 90 p. (In Russ.)
- Borisova L.S. (2016). Asphaltenes – successors of the genetic code of kerogen. *Geologiya Nefti i Gaza = Russian Oil And Gas Geology*, 6, pp. 75–78. (In Russ.)
- Borisova L.S. (2019). The Origin of Asphaltenes and Main Trends in Evolution of Their Composition During Lithogenesis. *Petroleum Chemistry*, 59(10), pp. 1118–1123. <https://doi.org/10.1134/S0965544119100037>

Borisova L.S., Fomin A.N. (2020). Transformation of Resin–Asphaltene Components of Dispersed Organic Matter in the Meso- and Apocatagenesis Zone. *Petroleum Chemistry*, 60(6), pp. 648–658. <https://doi.org/10.1134/S0965544120060031>

Borisova L.S., Fursenko E.A., Kostyreva E.A., Timoshina I.D. (2019). Complex of chemical and physical methods for obtaining and studying components of organic matter in rocks and oil deposits (methodological guide). Novosibirsk: RIC NSU, 84 p. (In Russ.)

Borisova L.S., Kontorovich A.E. (1991). Methodological recommendations on the scheme for studying asphaltenes for the purpose of diagnosing oil-producing rocks and quantitatively assessing the prospects for oil and gas potential. Novosibirsk: SNIIGGIMS, 28 p. (In Russ.)

Dindoin V.M. (1973). EPR spectroscopy and its possibilities in organic geochemistry. *Tr. SNIIGGIMS*, (166), pp. 37–54. (In Russ.)

Dolzhenko K.V., Fomin A.N., Melennevsky V.N. (2019). Geochemical characteristics of terrigenous organic matter from the Upper Paleozoic complex of the Viluy Syncline and some features of its transformation under thermobaric conditions at great depths. *Georesursy = Georesources*, 21(4), pp. 4–12. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.77-84>

Faizullina E.M., Zhukova A.V., Solovyeva I.L. (1992). Empirical model of transformation of chemical structure of sapropelic dispersed organic matter in the catagenesis and apocatagenesis zone. *Coll. papers: Modeling of oil generation processes*. Moscow: Nauka, p. 56. (In Russ.)

Fomin A.N. (2011). Catagenesis of organic matter and oil and gas potential of Mesozoic and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin. Novosibirsk: IPGG SB RAS, 331 p. (In Russ.)

Frolov V.I., Syundukov Sh.A., Bakin V.E. (1987). On the catagenesis of organic matter in deep-seated horizons of the central part of the Viluy syncline. *Doklady AN SSSR*, 297(2), pp. 442–444. (In Russ.)

Gabinet M.P., Gabinet L.M. (1988). Catagenetic zonation and distribution of oil and gas deposits at great depths in the deposits of the Subcarpathian Trough and the Paleozoic of the Dnieper-Donetsk Basin. *Conditions of oil formation at great depths*. Moscow: Nauka, p. 121. (In Russ.)

Grausman V.V., Meien S.V. (1987). Stratigraphy of Upper Paleozoic deposits of the Viluy Syncline. *Izvestiya AS USSR, Geology series*, 10, pp. 54–60. (In Russ.)

Isaev V.I., Rilova T.B., Gumerova A.A. (2014). Paleoclimate of Western Siberia and realization of the generative potential of oil-bearing deposits. *Izvestiya TPU = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 324(1), pp. 93–101. (In Russ.)

Kashirtsev V.A. (2018). Hydrocarbons occluded by asphaltenes. *Russian Geology and Geophysics*, 59(8), pp. 975–982. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.017>

Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshv S.I. (1985a). Regularities of carbon isotope fractionation in sediments. *Geologiya i geofizika*, (9), pp. 34–42. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshv S.I. (1985b). Distribution of stable carbon isotopes in sediments of different genetic nature. *Geologiya i geofizika*, (7), pp. 3–11. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Borisova L.S. (1994). Composition of asphaltenes as an indicator of the type of dispersed organic matter and oils of Western Siberia. *Geokhimiya*, (11), pp. 1660–1667. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Burstein L.M., Livshits V.R. (2021). The Theory of Naphthidogenesis: A Quantitative Model of the Catagenetic Evolution of Aquatic Organic Matter. *Russ. Geol. Geophys.*, 62(08), pp. 840–858. <https://doi.org/10.2113/RGG20214360>

Kontorovich A.E., Danilova V.P., Dindoyan V.M. (1973). Changes in the chemical composition of humic organic matter and its paramagnetic properties in the catagenesis zone. *Doklady AN SSSR, Geolog. ser.*, 209(6), pp. 1431–1434. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Dolzhenko K.V., Fomin A.N. (2020). Transformation of Terrestrial Organic Matter during Mesocatagenesis and Apocatagenesis. *Russ. Geol. Geophys.*, 61(8), pp. 891–905. <https://doi.org/10.15372/RGG2020116>

Kontorovich A.E., Parparova G.M., Trushkov P.A. (1967). Metamorphism of organic matter and some issues of oil and gas potential (on the example of Mesozoic deposits of the West Siberian Plain). *Geologiya i geofizika*, (2), pp. 16–29. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Polyakova I.D., Kolganova M.M., Soboleva E.I. (1988). Transformation of organic matter in meso- and apocatagenesis. *Sovetskaya geologiya*, (7), pp. 26–35. (In Russ.)

Kontorovich A.E., Rogozina E.A. (1967). Scale of hydrocarbon gas formation in Mesozoic deposits of the West Siberian Lowland. Geology and oil and gas potential of the southeast of the West Siberian Plate. *Tr. SNIIGGiMS*, (65), pp. 13–25. (In Russ.)

Melenevsky V.N., Polyakova I.D., Gladkiy Y.U. (1989). Catagenetic transformations of organic matter in the Viluy syncline. *Geologiya Nefti i Gaza = Russian Oil And Gas Geology*, (9), pp. 37–38. (In Russ.)

Modern methods of analysis in organic geochemistry (1973). Ed. by A.E. Kontorovich. *Tr. SNIIGGiMS*, (166), 100 p. (In Russ.)

Neruchev S.G. (1983). Gas generation during catagenesis of organic matter in sedimentary rocks. Leningrad: Nedra, 64 p. (In Russ.)

Polyakova I.D., Bogorodskaya L.I., Soboleva E.I. (1991). Transformation of organic matter in coal deposits of the Viluy syncline at great depths. Geochemistry of oil and gas deposits in Siberia. *Tr. SNIIGGiMS*, pp. 48–57. (In Russ.)

Semenov V.P., Zheleznyak M.N. (2013). Geothermal conditions of the Viluy syncline. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*, XVII(4), pp. 3–10. (In Russ.)

Silina N.P., Kaplan Z.G., Kunaeva N.T., Klindukhov V.P. (1992). Experimental model of asphaltene transformation in the catagenesis zone (using clarain coals of the Donbass as an example). *Coll. papers: Modeling of oil generation processes*. Moscow: Nauka, p. 63. (In Russ.)

Snowdon L.R., Volkman J.K., Zhang Z., Tao G., Liu P. (2016). The organic geochemistry of asphaltenes and occluded biomarkers. *Organic Geochemistry*, 91, pp. 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.11.005>

Surkov V.S., Devyatov V.P., Zhero O.G. (1993). Structure of the earth's crust in the area of the Tyumen super-deep well. *Geologiya i geofizika*, (1), pp. 120–126. (In Russ.)

Trofimuk A.A., Kontorovich A.E. (1965). Some issues of the theory of organic origin of oil and the problem of diagnosing oil-bearing strata. *Geologiya i geofizika*, (12), pp. 3–14. (In Russ.)

Vassoevich N.B. (1967). Theory of sedimentary-migratory origin of oil. *Izvestiya AS USSR, Geol. ser.*, (11), pp. 137–142. (In Russ.)

Zelichenko I.A., Neruchev S.G., Polovnikova I.A., Rogozina E.A., Filatov S.S., Klimova L.I. (1978). Features of catagenetic transformation of humic matter in dispersed organic matter. *Accumulation and transformation of organic matter in modern and ancient sediments*. Moscow: Nauka, pp. 119–125. (In Russ.)

About the Authors

Kirill V. Dolzhenko – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher at the Laboratory of Oil and Gas Geochemistry, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
3 Ak. Koptuyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Lyubov S. Borisova – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the Laboratory of Oil and Gas Geochemistry, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of the Department of Petroleum and Gas Field Geology, Geological and Geophysical Faculty, Novosibirsk State University

3 Ak. Koptuyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Alexander N. Fomin – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher at the Laboratory of Oil and Gas Geochemistry, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Petroleum and Gas Field Geology, Geological and Geophysical Faculty, Novosibirsk State University,

3 Ak. Koptuyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Irina Dmitrievna Popova – Engineer at the Laboratory of Oil and Gas Geochemistry, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Graduate student at the Department of Petroleum and Gas Field Geology, Geological and Geophysical Faculty, Novosibirsk State University

3 Ak. Koptuyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Manuscript received 13 January 2023;

Accepted 11 July 2023; Published 30 September 2023